

ГИБКИЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

С.Е. Демьянов¹⁾, А.В. Петров¹⁾, Е.Ю. Канюков¹⁾,
А.Л. Козловский^{2, 3)}, К.К. Кадыржанов²⁾, М.В. Здоровец^{2, 3)}

¹⁾НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,

ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, demyanov@physics.by, petrov@physics.by, ka.egor@mail.ru

²⁾Институт ядерной физики Республики Казахстан, Алматы, 050032, Казахстан,
artem88sddt@mail.ru, kadyrzhnov1945@gmail.com, mzdorovets@gmail.com

³⁾Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана, 010008, Казахстан

Разработаны тонкопленочные структуры с нанопорами в полиимиде, заполненными проводящим материалом, на основе которых созданы действующие макеты гибких микроэлектронных устройств (индуктор, трансформатор, конденсатор). Микроиндуктор имеет трехмерную конфигурацию с толщиной и шириной витка 10 мкм и 100 мкм, соответственно, и индуктивность $\sim 3 \times 10^{-4}$ Гн при добротности, равной 8, на частоте 0.2 ГГц. Высокочастотный микротрансформатор напряжения состоит из двух обмоток с соотношением витков 1:1.5. Испытания показали его работоспособность в интервале частот $10^7 - 10^9$ Гц с коэффициентом связи около 90 %. Микроконденсатор характеризуется практически независимой от частоты емкостью порядка 0.5-0.6 пФ при частотах до 1 ГГц. Показано, что конструирование элементов электрических цепей на гибкой подложке дает возможность их использования на сложнопрофильных и подвижных поверхностях с одновременным уменьшением массогабаритных показателей.

Введение

В последние годы активно проводятся работы по созданию микроэлектронных устройств, что связано с развитием таких технологий, как ионно-лучевое напыление, гальванопластика и фотолитография [1-4]. При этом микроприборы, как правило, формируются послойно на твердой подложке (преимущественно кремниевой), с использованием прослоек из изолирующего материала, что позволяет получать планарные устройства площадью в несколько квадратных миллиметров, и толщиной несколько сотен микрон. Они используются в биологических и медицинских приборах, компьютерах [4-6], при создании исследовательского оборудования [1-3], а также в системах связи и аэрокосмических разработках [4].

Недостатком таких приборов является жесткость, что усложняет их использование на сложнопрофильных и подвижных поверхностях. Конструирование элементов электрических цепей на гибкой подложке позволяет решить эту проблему. В связи с этим задача создания «гибкой электроники» является одной из наиболее актуальных для современного материаловедения и микроэлектроники [6-8].

Среди развиваемых в настоящее время способов получения подобных элементов особое место занимает так называемая ядерная технология, основанная на облучении материалов (прежде всего диэлектриков) высокоэнергетичными тяжелыми ионами с образованием сильно разупорядоченных зон диаметром несколько нанометров [9-10]. Возможность их селективного вытравливания позволяет сформировать каналы с аспектным отношением (отношение диаметра к ширине) до 10000 [10]. Заполнение каналов различными веществами дает возможность создания структур сложной геометрии на гибкой диэлектрической подложке [11-14]. Наиболее подходящим материалом является полиимид, так как он выдерживает температуры до 400–500 °С без каких-либо химических и структурных изменений [11-12].

Технологические особенности

Относительно простым способом создания гибких микроэлектронных устройств по сравнению с существующими на сегодняшний день технологиями [2-5, 15-16] является использование в качестве основы пористой полиимидной пленки. Поры в полиимиде могут быть сформированы с использованием технологии треков быстрых тяжелых ионов [9-14]. Эта методика связана с формированием узких и протяженных областей радиационного повреждения в результате воздействия на вещество ионов с высокой энергией. Поры (протравленные ионные треки) различных форм и размеров формируются в облученном материале за счет химического воздействия специальных травителей, удаляющих материал в области треков с модифицированными свойствами. В нашем случае цилиндрические поры были получены в пленке полиимида толщиной 20 мкм химическим травлением в растворе NaOCl латентных ионных треков, после ее облучения ионами аргона с энергией 350 МэВ и флюенсом 1×10^6 см⁻². В результате травления получалась матрица с порами со средним диаметром 2 мкм и плотностью 0.8×10^6 см⁻².

Для формирования обмотки микроиндуктора на полученную пористую полиимидную пленку при помощи термического напыления наносилась медь через специальные маски. Сначала с обеих сторон полиимидной пленки накладывались 2 идентичные маски с заданным количеством и расположением отверстий, которые, при напылении меди под углом $\sim 45^\circ$, формировали вертикальные столбики металла в порах, выполняющие роль переходных проводников между слоями обмотки. Далее, на одной из сторон полиимидной пленки с помощью маски под углом $\sim 90^\circ$ напылялись медные проводники, горизонтально соединяющие вертикальные столбики металла в порах. Таким способом была создана одна часть обмотки индуктора. Напыление меди для образования второй части обмотки производилось на обратной стороне полиимидной пленки с помощью маски, форма которой позволяла диагонально соединить межслойные металлические переключки и

сформировать структуру обмотки индуктора в целом. В результате данных технологических операций получена обмотка микроиндуктора, имеющая трехмерную конфигурацию и состоящая из 7 витков толщиной 10 мкм при ширине витка 200 мкм и межвитковым зазоре 30 мкм.

Преобразование полученного индуктора в микротрансформатор производилось путем добавления второй обмотки, согласно описанной выше технологической схеме. Прототип микротрансформатора имел трехмерную конфигурацию и состоял из двух обмоток с числом витков 3 и 4. Толщина витков равнялась 10 мкм при ширине витка 100 мкм и межвитковым зазоре 30 мкм. Аспектное соотношение составило 3,3.

Создание высокочастотного микроконденсатора также производилось на основе гибкой диэлектрической пленки полиимиды толщиной 20 мкм со сквозными цилиндрическими порами, на которой методом термического напыления меди через трафаретные маски создавалась структура микроконденсатора. На первом этапе с обеих сторон поверхности полиимидной пленки через трафаретные маски с заданным количеством и расположением отверстий методом термического напыления формировались несоединенные между собой две группы трёхмерных медных электродов, расположенных как на поверхности, так и в порах полиимидной пленки. Далее, на обе стороны полиимидной пленки с помощью трафаретной маски напылялись две плоские медные контактные площадки размером $1.5 \times 1 \text{ мм}^2$, что позволило сформировать конденсаторную структуру. Сконструированный таким образом микроконденсатор имел трехмерную конфигурацию и состоял из двух групп медных электродов, по 9 с каждой стороны полиимидной пленки. Ширина каждого из них составляла 50 мкм, толщина – 25 мкм с зазором между ними 50 мкм.

Функциональные характеристики

Для изучения частотных зависимостей прототипов микроэлектронных устройств в диапазоне 10 Гц – 1 ГГц, при комнатной температуре использовались векторные анализаторы импеданса HP4191 и HP4192. По результатам исследований определено, что микроиндуктор устойчиво функционирует при частотах до 500 МГц, однако его индуктивность сильно зависит от частоты. Величина индуктивности вначале уменьшается примерно на 2.5 порядка, а затем, при частотах выше ~ 50 кГц, она становится практически постоянной и достигает 0.3 мГн. Можно сделать вывод о том, что данная частотная зависимость связана с влиянием резистивных и емкостных потерь в системе, а также с влиянием электромагнитных полей рассеяния, появляющихся в микроиндукторе с увеличением частоты [12, 13].

Наблюдавшееся экспериментальное значение индуктивности (L) микроиндуктора согласуется с теоретической оценкой [17]:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{2\pi r_c} \quad (1)$$

где μ – магнитная восприимчивость, которую в данном случае полагаем равной 1 Н/м; N – количество витков в обмотке, равное 7; A – поперечное сечение катушки, равное примерно $8 \times 10^{-9} \text{ м}^2$; r_c – радиус катушки, равный примерно $2 \times 10^{-4} \text{ м}$. Таким образом, расчётное значение индуктивности составляет ~ 0.26 мГн.

Добротность микроиндуктора достигает максимального значения 7 при частоте 250 МГц, после чего она уменьшается до нуля при частотах ~ 1 ГГц, когда система теряет свои индуктивные свойства.

При измерении входного и выходного сигналов микротрансформатора для сигналов прямоугольной и синусоидальной формы различных частот в мегагерцовом диапазоне получено эффективное преобразование сигнала, которое сохраняется до около-гигагерцового диапазона, где постепенно проявляется смещение фаз между входным и выходным сигналами.

Кэффициент связи микротрансформатора оценивался согласно соотношению:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (2)$$

где L_p – индуктивность первичной обмотки, а L_s – индуктивность вторичной обмотки, и его значение лежало в пределах ~90%. Полученные результаты указывают на возможность использования микротрансформатора в интервале частот 10^6 – 10^9 Гц.

Результаты измерений характеристик микроконденсатора свидетельствуют о том, что его ёмкость в интервале частот от 10^6 до 10^7 Гц составляет 0,2 пФ, а в интервале от 10^7 до 10^9 Гц – находится в пределах от 0.5 – до 0.6 пФ. Результаты измерений хорошо согласуются с расчетами, проведенными в рамках «проводочной модели» [18], согласно которой выражение для емкости C_{wm} между двумя проволоками (металлом локализованным в порах) с учетом полей рассеяния имеет вид:

$$C_{wm} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon h}{\ln \left[\frac{d}{2r_0} + \sqrt{\left(\frac{d}{2r_0} \right)^2 - 1} \right]} \quad (3)$$

где h – длина проволоки (высота поры, 20 мкм), r_0 – радиус ионного трека, взятый равным 1 мкм, и d – расстояние между обкладками конденсатора (50 мкм). Важно заметить, что оценка согласно выражению (3) принимает во внимание только две противостоящих проволоки. Однако, в реальном устройстве имеется множество, противостоящих друг другу пор. Соответственно, для решения задачи с множеством пор необходимо ввести поправочный коэффициент:

$$S = \frac{l}{\sqrt{\Phi}} \quad (4)$$

где l – длина контактной области конденсатора, а Φ – плотность пор, которая в данном случае была равна 10^6 см^{-2} . Для получения искомой емкости конденсатора C , значение C_{wm} должно быть умножено на фактор S .

Заключение

На основании пористых полиимидных пленок, полученных с применением ионно-трековой технологии, созданы прототипы гибких микроэлектронных устройств со следующими параметрами: микроиндуктор – индуктивность на частоте 0,25 ГГц составляет 3×10^{-4} Гн при добротности 7; высокочастотный микротрансформатор напряжения – коэффициент связи ~90 % в интервале частот $10^6 - 10^9$ Гц; микроконденсатор – ёмкость в интервале частот от 10^6 до 10^7 Гц составляет 0,2 пФ, а в интервале от 10^7 до 10^9 Гц – от 0,5 до 0,6 пФ. Все устройства имеют 3D конфигурацию с толщиной, соответствующей толщине полиимидной пленки (20 мкм) и латеральными размерами ~100 мкм. При последующей миниатюризации масок возможно уменьшение габаритов микроэлектронных устройств от размера $\sim 10^{-2}$ мм³ до $\sim 10^{-6}$ мм³, что позволит на полимерной пленки размером 5×5 мм² формировать более 50 микроэлектронных устройств.

Микроэлектронные устройства на основе нанопористой полиимидной пленки могут эффективно использоваться в компьютерных системах, в системах связи (в осцилляторах для телекоммуникационных систем) и в аэрокосмических проектах. Важными преимуществами использования данных систем являются их легкость, возможность крепления на сложнопрофильных поверхностях и высокая термическая стабильность [12-16]. Также следует отметить, что в настоящее время освоены технологии, позволяющие получать пористую пленку полиимида со сравнительно небольшими финансовыми затратами [10], т.е. стоимость создаваемых микроэлектронных устройств не будет превышать стоимости существующих аналогов на жесткой подложке.

Список литературы

1. Yamasawa K., Maruyama K., Hirohama I., Biringer P. // IEEE Trans. Magn. 1990. V. MAG-26. P.1204 – 1209.
1. Yamaguchi H., Sato Y., Kataoka T. // IEEE Transact. on Magn. 1992. V. 28. P. 2232-2234
2. Ahn C.H., Kim Y.J., Allen M.G. // IEEE Transact. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 1994. V.A17. P.463-469
3. Park J.Y., Allen M.G. // Microelectronics International. 1997. V.14. P. 8 - 11
4. Basteres L., Mhani A., Valentin F., Karam J.-M. // US Patent No. 6,456,183 B1. 24.09.2002
5. Sekitani T., Zschieschang U., Klauk H., Someya T. // Nature Materials. 2010. V. 9. P. 1015-1022.
6. Zschieschang U., Ante F., Kern K., Klauk H., Yamamoto T., et al. // Advanced Materials. 2010. V. 22. P. 982-985.
7. Nakano Sh., Sekitani Ts., Yokota T., Someya T. // Applied Physics Letters. 2008. V. 92. P. 053302 – 053307.
8. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Ed. by D.Fink. Heidelberg. Springer Series in Materials Science. V. 63. 2004.
9. Реутов В.Ф., Дмитриев С.Н. // Российский химический журнал (Журнал Рос. хим. общества им. Д. И. Менделеева). 2002. Т. XLVI. №5. С. 74–80.
10. Fink D., Petrov A.V., Rao V., Wilhelm M., et al. // Radiation Measurements. 2003. V. 36. P. 751 – 755.
11. Lindeberg M., Hjort K. // Sensors and Actuators. 2003. V. A105. P. 150-161.
12. Lindeberg M., Hjort K. // Microsystem Technologies. 2004. V. 10. P. 605 – 621.
13. Toulemonde M., Trautmann C., Balanzat E., Hjort K., Weidinger A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2004. V.36. P. 1 – 8.
14. Saidani M., Gijs M.A.M. // J. Micromech. Microeng. 2002. V. 12. P. 470 – 474.
15. Saidani M., Gijs M. // Journal of Microelectromechanical Systems. 2003. V. 12. № 2. P. 172 – 178.
16. Доброневский О.В., Справочник по радиоэлектронике, Киев «Вища школа», 1974.
17. K pfm ller K. Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1962 (in German).

FLEXIBLE MICROELECTRONIC DEVICES

Sergey Demyanov¹⁾, Alexander Petrov¹⁾, Egor Kaniukov¹⁾,
Artem Kozlovskiy^{2, 3)}, Kairat Kadyrzhanov²⁾, Maxim Zdorovets^{2, 3)}

¹⁾Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus, 220072, Minsk, Brovkiy str. 19,
demyanov@physics.by, petrov@physics.by, ka.egor@mail.ru

²⁾Institute of Nuclear Physics of Kazakhstan Atomic Energy Committee,
Almaty, 050032, Republic of Kazakhstan,

artem88sddt@mail.ru, kadyrzhanov1945@gmail.com, mzdorovets@gmail.com

³⁾L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan

Thin-film structures in nanopores in polyimide, filled with conducting material have been developed. Service models of flexible microelectronic devices (inductor, transformer and capacitor) having a three-dimensional configuration were created on the base on these structures. The microinductor has a thickness and width of the winding of 10 µm and 100 µm, correspondingly, and inductance ~ 3×10^{-4} H at the quality factor of 7 on the frequency 0.25 GHz. The high-frequency voltage microtransformer consists of two windings with a relation of turns 1:1.5. Examinations have shown its working efficiency in the frequency range $10^6 - 10^9$ Hz with a coupling factor of about 90 %. The microcapacitor is characterized by a practically frequency-independent capacity in the range 0.5-0.6 pF at frequencies up to 1 GHz. It has been shown that the design of electrical circuit elements on a flexible substrate enables their use on the figurine and mobile substrates with a simultaneous decrease of the mass and dimensions parameters.